

## 複合位相アンジュレータによる吸引力自己相殺

### SELF-CANCELLATION OF MAGNETIC FORCE BY PHASE-COMBINED UNDULATOR

金城良太<sup>#, A)</sup>, 田中隆次<sup>A)</sup>

Rtyota Kinjo<sup>#, A)</sup>, Takashi Tanaka<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> RIKEN Spring-8 Center

#### Abstract

We proposed the new undulator magnetic circuit so-called phase-combined undulator<sup>[1]</sup>, having nearly zero magnetic force between the upper and lower magnet array is proposed, which significantly simplifies the mechanical structure of undulators. In the undulator, each magnet array is divided into a number of sections, half of which are phase-shifted according to a particular rule without breaking the periodicity in the undulator field. Calculation results show that the magnetic force can be reduced down to less than 1/50 of that in the Halbach undulator, when the gap over period is in practical range, more than or equal to 1/18.

#### 1. はじめに

世界中で建造中、計画中の低エミッタンスリングでは、第三世代放射光源と同様に大量のアンジュレータが必要となる。また、Self-Amplified Spontaneous Emission (SASE)スキームを利用した X 線自由電子レーザーにおいても、数 10 m から 100 m もの長尺のアンジュレータセクションが必要となる<sup>[2,3]</sup>。さらに近年提案されている SASE の時間コヒーレンスを改善するスキーム<sup>[4,5]</sup>や、アト秒の X 線パルスレーザーを作り出すスキーム<sup>[6]</sup>においては、ゲインの低下のためより長尺のアンジュレータが必要となる。アンジュレータのコストを削減することは利用の可能性を大きく開く重要な課題である。

アンジュレータは、その巨大な磁気吸引力の下で高い精度でギャップを駆動するために剛性の高い機械部品や架台を必要とする。さらに、今や多くの放射光施設で使用されている真空封止アンジュレータにおいては、真空槽内の磁石列ガーダーの変形を防ぎ高いギャップの均一度を確保するため、多くの負荷分散機構が、真空と大気との接続部に必要となる。このような伝統的なアンジュレータは、その心臓部である磁石列に比べて重く大きく複雑で、製造や設置のコストが高いといった構造的な問題を抱えてきた。

上記の議論から、新しいアンジュレータのコンセプトを考えることができる。もしアンジュレータの巨大な磁気吸引力を主磁石列の近傍で消し去ることができれば、重く大きな機械架台はもはや必要なくなり、そのためアンジュレータはより軽量かつコンパクトになる。その結果、製造や輸送、収納部内への設置のコストや期間は大幅に減少する。これまでに、吸引力を打ち消す二つの方法が提案されている。一つは、SOLEIL の真空封止ウイグラーに採用された、異なる長さでバネ定数を持つ複数のバネを組み合わせて主磁石列の両側に配置する機械的な方式である<sup>[8]</sup>。もう一つは、SPRING-8 で開発された真空封

止リボルバーアンジュレータに採用された、主磁石列と同じ周期を持った反発磁石列を主磁石列の両側に取り付ける方式である<sup>[9]</sup>。これらの方式は、吸引力を相殺するという観点からはうまく働くが、新しいコンセプトには合致しない。前者の手法では、バネによって側面からの磁石列へのアクセスが不可能となりアンジュレータの磁場調整に必要な精密な磁場計測が難しい、バネの作る反発力のギャップに対する依存性が磁石と大きく異なる、電子ビームに近い厳しい環境下でのバネの信頼性といった問題がある。後者の方法は、磁石及び磁石列ホルダーの数が 3 倍になるため、磁石列の組み付けや取り外しにかかるコストや、真空中でのガス放出量が増大するという問題点がある。最近、我々は多極着磁ブロックと呼ばれる、あらかじめパルス磁場によって周期的磁気回路を書き込んだ磁石ブロック<sup>[10,11]</sup>による、製造や組み立てが非常に簡単で、真空中での放出ガス量が少ないといった利点を利用した新しい吸引力相殺手法の提案を行い昨年の加速器学会等でも発表を行った<sup>[12,13]</sup>。また、このコンセプトに基づく吸引力相殺機構の搭載を前提とした軽量コンパクトかつコストパフォーマンスに優れたアンジュレータの試作機についても開発を進めている。

本発表では、上記とは全く異なる軽量・コンパクトかつコストパフォーマンスに優れたアンジュレータの候補である複合位相アンジュレータ (Phase-Combined Undulator: PCU) について報告する。PCU は本質的に磁気吸引力が存在せず、吸引力相殺機構を必要としない。この磁気回路においては、磁石列は複数のセクションに区切られ、半分がアンジュレータ磁場の周期性を破らないように特定のルールに従って電子ビーム軸方向に位相シフトして(ずれて)いる。最初に、PCU の原理について述べる。次に、提案したスキームの有効性を示すための数値計算例について述べる。最後にこれらの結果について議論を行う。

<sup>#</sup> r-kinjo@spring8.or.jp

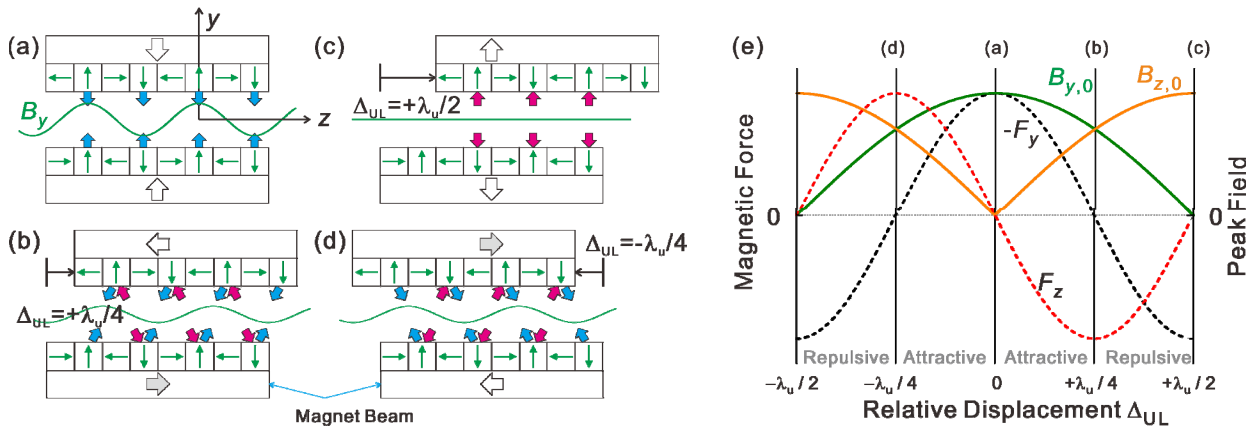


Figure 1: Halbach arrays with the relative longitudinal displacement between the upper and lower magnet arrays  $\Delta_{UL}$  of (a) zero, (b)  $+\lambda_u/4$ , (c)  $+\lambda_u/2$ , and (d)  $-\lambda_u/4$ . The pair of small arrows indicates the attractive (blue) or repulsive (red) force between two magnets. The total forces acting on the magnet beam are drawn by the large arrows (white). The phase diagram of the forces and the peak fields are drawn in (e).

## 2. 理論

### 2.1 Halbach 型アンジュレータにおける位相シフト

PCU のコンセプトは、Halbach 型アンジュレータにおいて上側及び下側磁石列の相対的な位相を変化させることで、磁石列にかかる磁気力の向きが変化することに基づく。これは、APPLE-II 型などの楕円偏光アンジュレータにおいて、位相切り替え時によく知られている現象である。

Figure 1 (a) – (d)に Halbach 型アンジュレータにおける位相シフトを示す。(a)においては、簡単な為、 $y$  方向磁化を持つ磁石のみを考えるとそれぞれの磁石間の力は青矢印で示されるように吸引力であり、全体として、磁石列を支える磁石列ガーダーには白矢印で示されるような吸引力が働く。ここから(b)のように上側磁石列を  $1/4$  周期だけ  $+z$  方向にずらした場合、磁石には図のように斜め方向の吸引力と反発力が作用し、結果的に  $y$  方向の力は打ち消しあい、 $z$  方向の力が残る。全体として、磁石列ガーダーには白・灰色矢印で表されるような剪断力が発生する。このとき、アンジュレータ磁場としての  $B_y$  は  $1/\sqrt{2}$  の大きさとなる。

Figure 1 (e)は、位相シフト量の関数として、 $B_y$  の振幅、 $B_z$  の振幅、上側磁石列にかかる磁気力  $F_y$  および  $F_z$  をプロットしたものである。

### 2.2 複合位相アンジュレータの原理

Figure 2 に示すように、二つの位相シフトした異なる磁気回路 (a) および (b) を、アンジュレータ磁場として重要な  $B_y$  の周期性が失われないようにつなぎ合わせたのが  $D = 2$  の PCU 磁気回路 (c) である。ここで  $D$  は、後で述べる分割セクションの数を表す。シンボル  $\flat$  は上側の磁石列が下側に対して  $\Delta_{UL} = -\lambda_u/4$  だけずれたことを、シンボル  $\#$  は下側の磁石列が上側に対して  $\Delta_{LU} = -\lambda_u/4$  だけずれたことを表す。PCU においては、磁気回路 (a) および (b) で生じていた正または負の剪断力が磁石列

ガーダーの内部で打ち消しあって、架台や駆動機構に作用する外力として現れないようになっている。

Figure 2 (c)に示す PCU ( $D=2$ )の状態では、架台や駆動機構に作用する外力をなくすることができるが、セクションの接合点には大きな引張・圧縮応力がかかるため、磁石列ガーダーには高い剛性が求められる。そこで、Figure 2 (d)に示す PCU ( $D = N_u$ ) のように  $\flat$  セクションと  $\#$  セクションを一周期ごとに配置することによってガーダー内部の引張・圧縮応力を分散することが可能となる。ここで  $N_u$  は、アンジュレータの周期数で、この場合の分割数は周期数に等しい。

### 2.3 吸引・反発力の微調整方法

PCU の吸引・反発力を微調整する二つの方法がある [1]。一つは、追加の微小位相シフトで、セクション  $\flat$  および  $\#$  内の位相シフトをそれぞれ  $\Delta_{UL} = -\lambda_u/4 - \delta$  および  $\Delta_{LU} = -\lambda_u/4 - \delta$  とする方法である。もう一つは、磁化角度の微小回転で、セクション  $\flat$  および  $\#$  内の磁化角をそれぞれ  $-\theta$  および  $+\theta$  だけ回転させる方法である。二つの方法は、吸引・反発力を 10%程度微調整する範囲において  $\theta \approx \pi\delta/\lambda_u$  の場合には同じ効果を持つ。実用的には磁石列の組立の簡易さなどを考慮して選択することになる。

## 3. 実例

PCU の有効性を調べるため、Halbach 型、PCU ( $D = 2$ )、PCU ( $D = N_u$ ) の吸引力を数値計算により比較した。計算においては、周期 18 mm、磁石幅 40 mm、磁石の高さ 20 mm とした。数値計算には、三次元の磁場計算ソフトウェア RADIA [15]を用い、磁石の磁化に平行および垂直な向きの磁気感受率をそれぞれ 0.05 および 0.17 とした。

Figure 3 (a) にそれぞれの方式で上側磁石列にかかる  $y$  方向の力をギャップの関数として示す。PCU においては、吸引力は Halbach 型よりずっと小さい値になっていることがわかる。PCU ( $D = 2$ ) の場合、

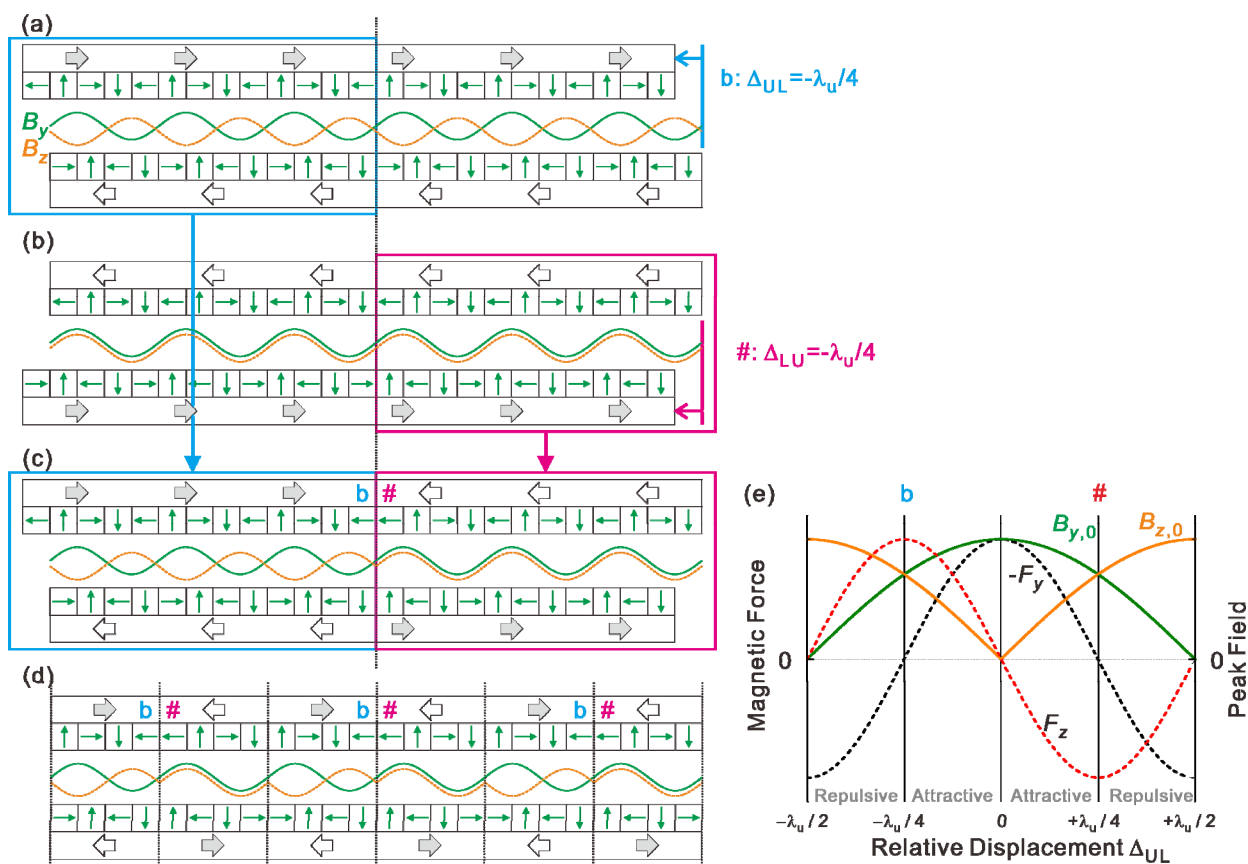


Figure 1: Conceptual drawing of the PCU. (a) The upper and (b) the lower phase-shifted configuration are combined as (c) the PCU with  $D = 2$  and (d) the PCU with  $D = N_u$ . The symbol  $b$  indicates that the upper magnets are displaced by  $\Delta_{UL} = -\lambda_u/4$  in the section, and the symbol  $\#$  indicates that the lower magnets are displaced by  $\Delta_{LU} = -\lambda_u/4$  as shown in (e) the phase diagram.

力は PCU ( $D = N_u$ ) より小さくすべてのギャップ範囲において常に吸引力として作用する。PCU ( $D = N_u$ ) においては、ギャップの大きいところでは反発力が働き、ギャップの小さいところでは吸引力が働く。ギャップに対する依存性の原因として、PCU ( $D = 2$ ) では磁石の磁気感受率が有限であることが支配的であることがわかっている。PCU ( $D = N_u$ ) においては、その効果の他に、セクションの分割数を多くしていることにより吸引力と反発力のギャップ依存性が若干異なっており、ギャップによって反発力や吸引力が表面化する。

Figure 3 (b)に、2.3 節で述べた吸引・反発力の微調整を行う前（白抜きシンボル）と後（塗りつぶしシンボル）を比較する。微調整方法を用いることによって、ギャップ 1 mm での値が大きく減少していることがわかる。微調整量を大きくとることでギャップ 1 mm での値をさらにゼロに近づけることも可能であるが、ギャップが大きい時に出てくる反発力が大きくなる。

#### 4. 一般的な議論

これらの結果は、ギャップ周期比が同じであれば一般化することができる。得られた数値を、テーブル 1 に示す。最小オペレーションギャップ  $g_{min}$  の周

期に対する比で分けている。例えば、 $g_{min}/\lambda_u \geq 1/6$  の場合、最大で 500 – 800 N まで抑えられており、 $g_{min}/\lambda_u \geq 1/18$  の場合、微調整なし及びありの場合でそれぞれ、2100 – 3900 N/m 及び 400 – 1200 N/m まで抑えられている。実用的な観点から言えば、磁気吸引力を完全にゼロにする必要はない。例えば磁石、磁石ホルダー及び磁石列ビームの自重は、片側でおおよそ 60 kg/m となる。もしギャップ周期比が 1/6 以上の場合には、吸引・反発力は重力と同等かそれ以下に抑えられており、実用的にはゼロに等しい。また、ギャップ周期比が 1/18 といった非常に狭いギャップで運転する場合でも、2.3 節で述べたいずれかの微調整方法により重力程度以下に吸引・反発力を抑える設計が可能である。逆に、駆動機構を考える上で安定性を求めるためにある程度の負荷を必要とする場合には、微調整手法で述べた  $\delta$  や  $\theta$  を負にすることで吸引力を増やすことも可能であることを述べておく。

最後に、PCU の適用対象について検討しなければならない。PCU は明らかにハイブリッド型へ適用することができず、また K 値が Halbach 型の  $1/\sqrt{2}$  倍になるため強磁場を必要とする短周期アンジュレータへの適用は難しい。一方で、磁場強度への要求が緩やかである長周期アンジュレータにおいて、強大な

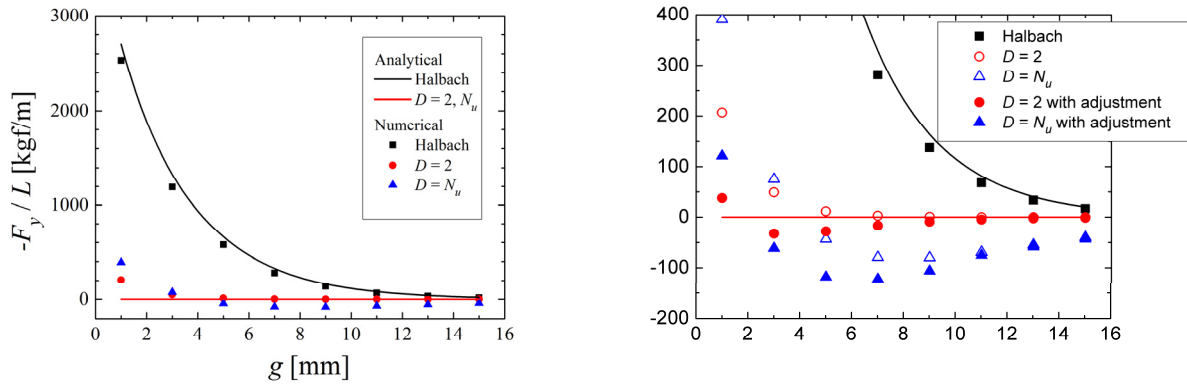


Figure 3: (a) Numerically calculated magnetic forces for the Halbach Undulator, the PCU ( $D=2$ ) and the PCU ( $D=N_u$ ). (b) Forces with and without the adjustments.

磁気吸引力を吸引力相殺機構なしにほぼゼロにできアンジュレータの構造を劇的に簡易化できるため非常に魅力的なオプションとなりうる。

Table 1: Maximum Absolute Forces.

$g_{\min} \geq 3$ mm ( $g_{\min}/\lambda_u \geq 1/6$ )	Max. $ F_y /L$ [N/m]
Halbach Undulator	12000
PCU ( $2 \leq D \leq N_u$ )	500 – 800
$g_{\min} \geq 1$ mm ( $g_{\min}/\lambda_u \geq 1/18$ )	Max. $ F_y /L$ [N/m]
Halbach Undulator	25000
PCU ( $2 \leq D \leq N_u$ )	2100 – 3900
With fine adjustment	400 – 1200

## 参考文献

- [1] R. Kinjo and T. Tanaka, Phys. Rev. ST-AB 17, 122401 (2014).
- [2] P. Emma et al., Nat. Photonics 6, 641 (2010).
- [3] T. Ishikawa et al., Nat Photonics 6, 540 (2012).
- [4] B.W.J. McNeil, N.R. Thompson, and D.J. Dunning Phys. Rev. Lett. 110, 134802 (2013).
- [5] J. Wu et al, Proc. of IPAC 2013, Shanghai, China, p. 2068 (2013).
- [6] T. Tanaka Phys. Rev. Lett. 110, 084801 (2013).
- [7] Z. Huang and I. Lindau., Nat. Photonics 6, 505 (2012).
- [8] O. Marcouille, Proc IPAC2010, Kyoto, Japan, WEPD009 (2010).
- [9] T. Bizen, Proc, SRI2003, San Francisco, USA, pp. 175 – 178 (2004).
- [10] S. Yamamoto, J. Phys. Conf. Ser. 425 032014 (2013).
- [11] S. Yamamoto, Proc, IPAC2014, WEOAA02 (2014).
- [12] R. Kinjo et al., Proc. FEL2014, Basel, Swiss, MOP023 (2014).
- [13] 金城良太ら、第 11 回加速器学会年会、青森、SLOL04 (2014) .
- [14] T. Tanaka and H. Kitramu, J. Synchrotron Radiant. 8, 1221 (2001).
- [15] K. Halbach, Nulc. Instrum. Method 169, 1 (1980).
- [16] O. Chubar, P. Elleaume, and J. Chavanne, J. Synchrotron Radiant. 5, 481 (1998).